

四频差动激光陀螺最佳工作点实时控制技术

王 飞 龙兴武 汪之国

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 为了降低四频差动激光陀螺(FMDLG)零偏对外界因素影响的敏感性,采用了最佳工作点实时控制技术。该技术使用色散平衡和稳频偏置的方法,对增益区磁场和失谐频率进行小幅度正弦调制,在 FMDLG 输出零偏中解调出误差信号,经负反馈控制回路使 FMDLG 在对外界干扰敏感性最小的唯一最佳工作点下工作。与仅使用光强差进行稳频的传统方法相比,最佳工作点控制技术大大降低了 FMDLG 的磁敏感度和零偏稳定性,证实了 FMDLG 最佳工作点实时控制技术的有效性;静态、动态测试实验结果证明了该技术的正确性。

关键词 激光器;程长控制;四频差动激光陀螺;最佳工作点;实时控制

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.1123001

Real-Time Control Technique of Optimal Operating Point in Four-Mode Differential Laser Gyro

Wang Fei Long Xingwu Wang Zhiguo

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract In order to minimize the bias sensitivity of a four-mode differential laser gyro (FMDLG) to external interference, an optimal operating point real-time control technique is adopted. Dispersion equalization and path-length control offset are used. The magnetic field of gain zone and detune frequency are sinusoidally modulated, then the error in the bias of FMDLG is demodulated. By negative feedback it is operated at the only optimal point on which the sensitivity to interference is smallest. The optimal operating point means the minimum bias sensitivity to magnetic field and path-length control error. In comparison with traditional path-length control method, the optimal operating point real-time control technique shows a great reduction of the gyro magnetic sensitivity and bias instability, which proves its effectiveness, and static and dynamic test results prove its correctness.

Key words lasers; path-length control; four-mode differential laser gyro; optimal operating point; real-time control

OCIS codes 140.3460; 140.3370; 230.2035

1 引 言

与机械抖动激光陀螺相比,四频差动激光陀螺(FMDLG)具有比例因子误差小、不产生机械噪声和干扰等优点,在航空、航天等领域具有广泛应用^[1~4]。为了能进一步提高 FMDLG 的性能,除了改进腔体设计外,陀螺外围电子控制装置的改进也是提高 FMDLG 性能的重要途径^[5,6],其中程长控制(PLC,又称稳频)是研究重点之一^[7~10]。

传统的四频差动激光陀螺使用光强差稳频,即将腔长稳定于左旋与右旋模式强度相等的位置,这是一种动态精度比较低的稳频方式,在环境变化条件下给陀螺零偏稳定度带来很大影响。理论和实验证明 FMDLG 存在一个最佳工作点,当陀螺工作于该点时零偏对磁场和腔长变化的敏感度最低^[11],这一结论使得最佳工作点实时控制技术成为可能。文献^[5]给出了利用腔长扫描和磁场扫描找出某陀螺

收稿日期: 2012-05-07; **收到修改稿日期:** 2012-06-25

作者简介: 王 飞(1979—),男,博士研究生,讲师,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。

E-mail: authurwang2046@163.com

导师简介: 龙兴武(1953—),男,教授,博士生导师,主要从事激光与光电子技术方面的研究。

E-mail: xwlong110@sina.com

最佳工作点的基本方法,本文旨在最佳工作点的寻找与实时控制技术的电路实现,以期应用于四频差动激光陀螺工程化电路中。

2 基本原理

FMDLG 的最佳工作点本质是陀螺同时处于色散平衡状态和最佳稳频偏置状态。色散平衡描述的是左右旋陀螺各自的两个模式具有相同色散的状态,在该状态下陀螺对失谐频率变化即腔长变化敏感程度最低,该状态通过控制加载在增益区轴向磁场的大小实现;最佳稳频偏置描述的是左右旋陀螺具有相同比例因子修正的状态,在该状态下陀螺对外界磁场变化的敏感度最低,该状态通过调整腔长控制机构上的压电陶瓷(PZT)电压实现,实际是调整左右旋模式平均频率相对于自发光中心频率的位

置,产生一定的失谐频率。可以看出,最佳工作点控制技术是更广义的稳频方法,不仅实现频率稳定功能,还要选择频率稳定的最佳点。

下面从 FMDLG 的模式分布角度分析最佳工作点控制技术的效应机制。

图 1 给出了 FMDLG 的第 q 阶以及相邻两阶纵模在频域的分布,其中 f_{sr} 为纵模频率间隔, ν_R 为左旋模式(LCP)与右旋模式(RCP)之间的互易偏频, ν_F 为法拉第偏频。可以看出,FMDLG 的频谱分布以一个纵模间隔为周期,即陀螺可以运行在任一阶存在的纵模上,陀螺开机运行时将按照所处温度条件不同选择最适合工作的纵模,一次开机运行过程中陀螺始终工作在同一阶纵模上,维持偏振态、腔长稳定是稳频电路的基本功能。

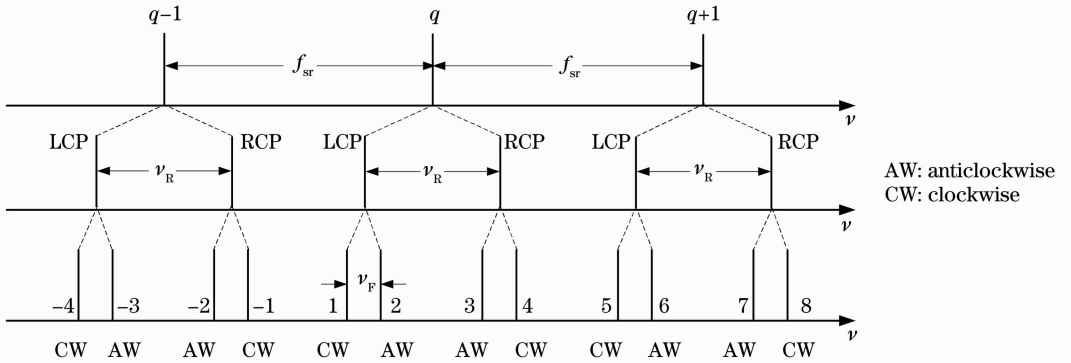


图 1 FMDLG 频谱分布

Fig. 1 Spectral distribution of FMDLG

图 2 从原理上描述了最佳工作点控制技术的效应机制。图 2(a)为未使用最佳工作点控制时陀螺各个模式的相对位置,可以看出左旋陀螺的 2 个模式 1 与 2、右旋陀螺的 2 个模式 3 与 4 在色散曲线上处于不同位置,这给陀螺零偏稳定性带来了很大影

响^[6],图 2(b)为采用最佳工作点控制技术之后 FMDLG 模式工作状态,由于塞曼效应的存在,增益曲线和色散曲线在外加磁场作用下分裂为两条,通过调整失谐频率和色散平衡的磁场大小,总能找到一个位置使得陀螺同时处于色散平衡状态和最佳稳

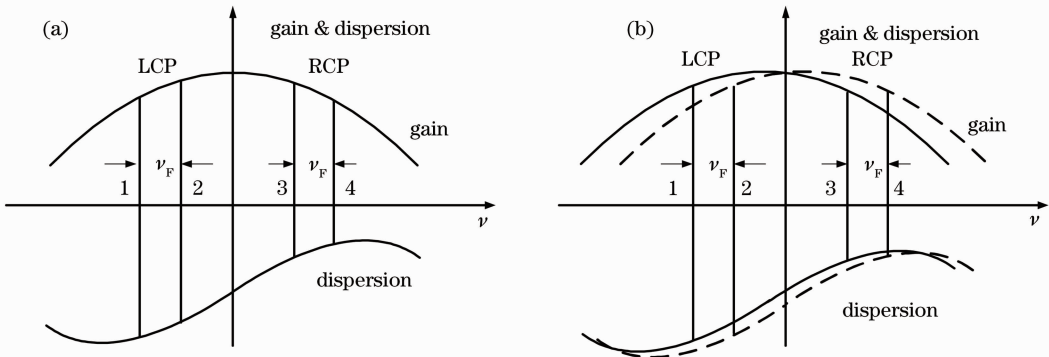


图 2 在非最佳工作点(a)及最佳工作点(b)下的控制技术对 FMDLG 模式状态的影响

Fig. 2 Influence of real-time control technique on the FMDLG mode state under non-optimal (a) and optimal (b) operating point

频偏置状态,而且,从图 2(b)中很容易看出,该最佳工作位置在同一纵模范围内是唯一的,此时色散平衡磁场产生的色散曲线等效频移等于法拉第偏频的频率。

下面通过实验标定检验最佳工作点是否真的存在以及其存在的唯一性。

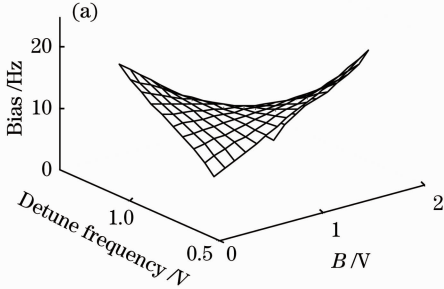


图 3 给出了根据文献[5]的方法扫描得出的某 FMDLG 零偏与失谐频率、色散平衡磁场强度(均以各自驱动电压 V 为单位)的关系图,可以看出,马鞍形曲面存在两个方向导数均为零的点 P ,最佳工作点确实存在且是唯一的,即 FMDLG 零偏关于失谐频率和增益区轴向磁场均存在唯一导数为零的点。

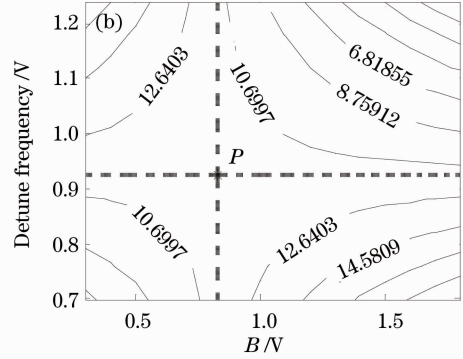


图 3 FMDLG 最佳工作点实验标定结果

Fig. 3 Calibration results of FMDLG under optimal operating point

从数学角度分析,FMDLG 输出零偏中与磁感应强度和稳频偏置有关的项可以表示为^[11]

$$\Delta\nu_D = k_0(V - V_0)(B - B_0), \quad (1)$$

式中 B_0 为色散平衡状态时线圈在增益区产生磁场的强度,也称为最佳磁场; V_0 为最佳稳频偏置状态对应的 PZT 电压,对应一定数值的失谐频率; k_0 为与失谐频率和磁场无关的系数,但与温度、增益等参量有关。

在 PZT 和磁场线圈上分别加载正弦调制信号,则有

$$V = V_0 + V_x + V_m \cos(\omega_P t + \varphi_P), \quad (2)$$

$$B = B_0 + B_x + B_m \cos(\omega_B t + \varphi_B), \quad (3)$$

式中 V_x 为 PZT 电压偏离 V_0 的程度; B_x 为磁场偏离最佳磁场的程度; V_m 和 ω_P 分别为 PZT 电压的调制幅度和频率, φ_P 为 PZT 初始相位; B_m 和 ω_B 分别为磁感应强度的调制幅度和频率, φ_B 为磁场初始相位。

将(2)式和(3)式代入(1)式,则可得到 FMDLG 输出零偏中

$$\begin{aligned} \Delta\nu_D = & k_0 V_x B_x + \\ & k_0 V_x B_m \cos(\omega_B t + \varphi_B) + k_0 B_x V_m \cos(\omega_P t + \varphi_P) + \\ & k_0 V_m B_m \cos(\omega_P t + \varphi_P) \cos(\omega_B t + \varphi_B). \end{aligned} \quad (4)$$

令 $e_L = k_0 V_x B_m$ 为系统偏离最佳稳频偏置的误差, $e_B = k_0 B_x L_m$ 为系统偏离最佳磁场的误差。系统中采用的相敏检波器相当于一个中心频率可调的窄带滤波器^[12],可从(4)式的零偏中将误差信号解调出来。

由以上理论分析、实验标定结果表明,FMDLG

零偏关于失谐频率和增益区轴向磁场均存在唯一导数为零的点,因此存在可能性使得利用相敏检波获取的 e_L 和 e_B 进行反馈控制使两个量趋近于 0,该反馈是收敛的,依此设计的反馈系统具有较好的稳健性。当 e_L 和 e_B 均为 0 时有 $V_x = 0, B_x = 0$,因此 $\Delta\nu_D = 0$,实现了最佳工作点的查找与控制,这即是整个电路要实现的目标。

3 系统设计与实验

3.1 最佳工作点控制系统的设计

首先对误差信号是否满足 FMDLG 的控制要求进行分析。影响色散平衡状态的主要因素是法拉第偏频的变化,也即法拉第元件在外界影响下产生的偏频量发生变化,影响最佳稳频偏置状态的主要因素是增益曲线的变化,两者都在温度影响下发生缓慢变化。由于陀螺屏蔽盒和腔体的热惯性,在实际应用中陀螺本体的温度变化率一般小于 $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,因此以 1 min 为更新时间对色散平衡和稳频偏置进行控制可以满足绝大部分应用场合的要求。由于 e_L 和 e_B 幅度很小,而 FMDLG 输出零偏中存在不可避免的随机游走噪声、量化噪声以及放电噪声,为了减小噪声对相敏检波输出的影响,需采用非常窄的低通滤波器,这导致相敏检波器积分时间较长。但激光陀螺一般要求稳频环路有 10 Hz 以上的带宽,又考虑到 e_L 在靠近最佳偏置附近时已接近于零,因此无法直接用于较高精度的稳频。为了解决这个问题,

分别以 e_L 和 e_B 控制稳频偏置和色散平衡磁场, 而从光强中提取误差信号来进行稳频, 具体实现如下。

对最佳工作点进行控制的系统 A 其原理如图 4 所示, ADC 为模数转换, DAC 为数模转换, FPGA 为现场可编程门阵列^[13]; 光电转换、放大和射频 (RF) 检波等部分已在文献[14]做了介绍, 这里仅对稳频偏置和色散平衡控制系统的软件部分进行说明。整个算法及控制都由数字信号处理器 (DSP) 实现, 分为 3 个控制环路: 环路 1 为稳频偏置控制环路, 在流经线圈的电流上由振荡器 OSC2 施加电流调制, 相敏检波器 PSD1 将陀螺输出零偏中出现的

调制幅度检出作为误差信号, 经比例积分微分 (PID) 控制器后成为稳频偏置控制信号 u_L ; 环路 2 为磁场控制环路, 通过振荡器 OSC1 在 PZT 上施加小抖动调制电压, 相敏检波器 PSD2 将陀螺输出零偏中出现的调制幅度检出作为误差信号, 经 PID 控制器后成为磁场控制信号 u_B 用于控制磁场; 环路 3 是稳频环路, 通过振荡器 OSC1 在 PZT 上施加小抖动调制电压, 相敏检波器 PSD3 从射频检波光强 I_A 中提取误差信号 e_1 , 然后减去 u_L 得到新的误差信号 $(e_1 - u_L)$, 再经 PID 控制器后用于控制程长即稳定陀螺工作频率。

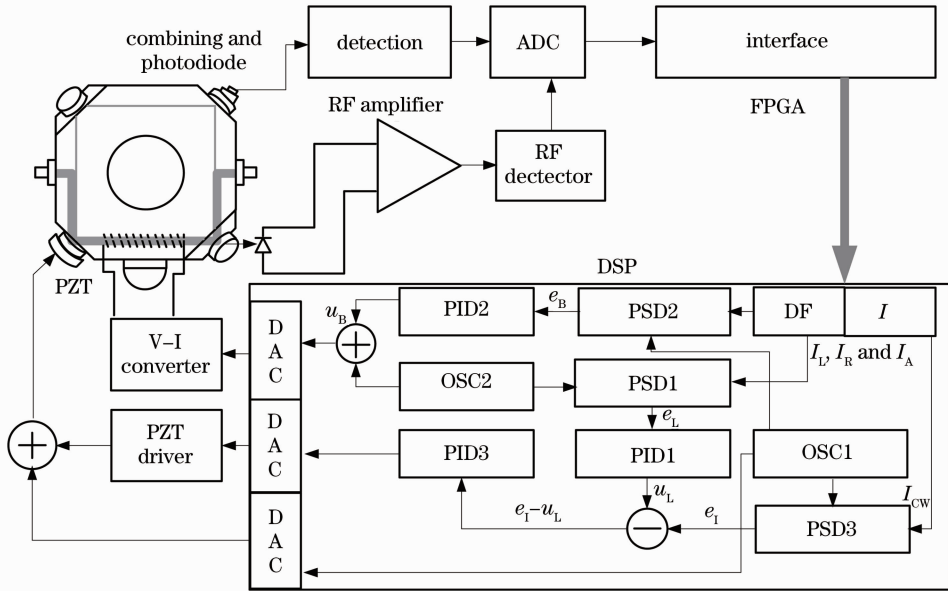


图 4 控制系统 A 框图

Fig. 4 Block diagram of control system A

3.2 最佳工作点控制系统性能验证

控制系统 B 是传统借助于左、右旋光强差进行程长控制的稳频系统, 其原理如图 5 所示^[15]: 该系统仅存在 1 个控制环路, 即根据左、右旋光强差信号 $\Delta I = I_L - I_R$ 进行程长控制、稳定陀螺工作频率。一

般来讲, 该系统的左右旋光强通过光学元件进行解调获得, 即“1/4 波片 + 偏振片”方案, 这种解调方式在装配过程中带来的误差将会为稳频引入一个随机大小的失谐频率, 在外界因素如温度等发生变化时解调光学元件位置及光学性质变化则会使该失谐频率发生变化, 且控制系统 B 并没有对失谐频率的变化采取任何监控措施, 这给陀螺输出零偏的稳定性来很大的影响。总之, 控制系统 B 仅在表现上稳定了每次陀螺开机时的左右旋模式的相对位置, 而对 2 个模式在增益曲线上的绝对位置即失谐频率大小以及色散情况均未进行控制, 这也是 FMDLG 此前性能一直受限的关键所在。

FMDLG 存在唯一的最佳工作点, 该最佳工作点由失谐频率、色散平衡磁场强度 2 个物理量描述, 这一结论使得 FMDLG 性能的进一步提高成为可能。采用最佳工作点控制技术的 FMDLG 可以实

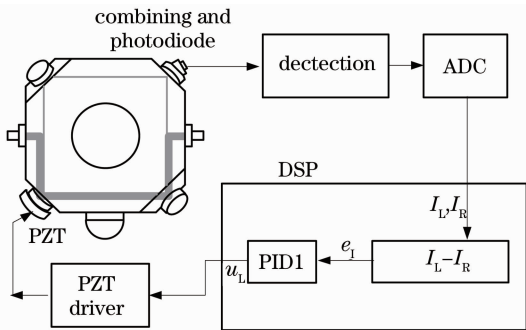


图 5 控制系统 B 框图

Fig. 5 Block diagram of control system B

时跟踪最佳工作点的变化,因此在磁敏感程度、零偏稳定性、零偏重复性等方面有了进一步提高,以下将对同一陀螺在 A、B 控制系统下的结果做出对比,以此验证最佳工作点控制技术的有效性,其他一些实验将验证该技术的正确性。

3.2.1 最佳工作点控制技术有效性的验证

1) 减小磁敏感度的有效性

在工程应用中,由于外界磁场发生变化而带来的陀螺输出零偏的变化造成了陀螺实际性能的下落,二频机械抖动陀螺由于内部运行的是线偏振光因此具有较低的磁敏感度,而 FMDLG 内部运行的是圆偏振光,磁场对其输出零偏的影响是巨大的。最佳工作点控制技术相比传统稳频方式最大的优势在于降低了 FMDLG 的磁敏感度。

FMDLG 的磁敏感度具有各向异性,实验中对三个方向的磁敏感度分别进行测试,选取的坐标系如图 6 所示。考虑到 FMDLG 在实际应用时都要进行磁屏蔽,屏蔽后陀螺感受到的磁场变化一般在 0~0.06 mT 范围内,因此只对该范围内的磁敏感度进行测试。实验设计如下:将未加任何磁屏蔽的陀螺固定于非铁磁性底座上并置于亥姆霍兹线圈中心,通过

调节亥姆霍兹线圈的电流来模拟外界磁场发生的变化。地磁场的水平分量一般认为在 0.05 mT 左右,测试中采用 FMDLG 方位固定但改变亥姆霍兹线圈方位的方式改变外界磁场方向,这种情况下地磁分量不变。为了减小其他因素带来的影响,在实验测试前将陀螺预热 2 h 至稳态,零偏取 100 s 的均值。

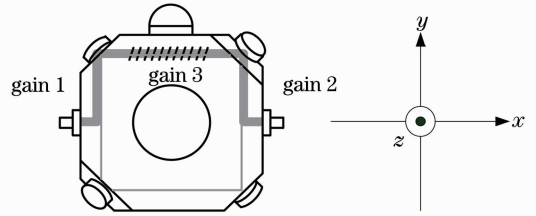


图 6 磁灵敏度测试的方向定义

Fig. 6 Direction definition in magnetic sensitivity test

采用传统光强差稳频时,FMDLG 磁敏感度的主要根源是纵向塞曼效应。将异面光路的侧面进行展开,如图 7 所示。磁场沿 x 方向时,在增益区上的有效分量为 $B_x \cos \theta$;沿 z 方向时,在增益区上的有效分量为 $2B_z \sin \theta$,因此磁敏感度之比为 $\cot(\theta/2) = 2.5$,与实际值 2.4 基本一致。当磁场沿 y 方向时,由于增益区 1 和 2 的光束传播方向相反,塞曼效应的影响相互抵消,因而磁敏感度很小。

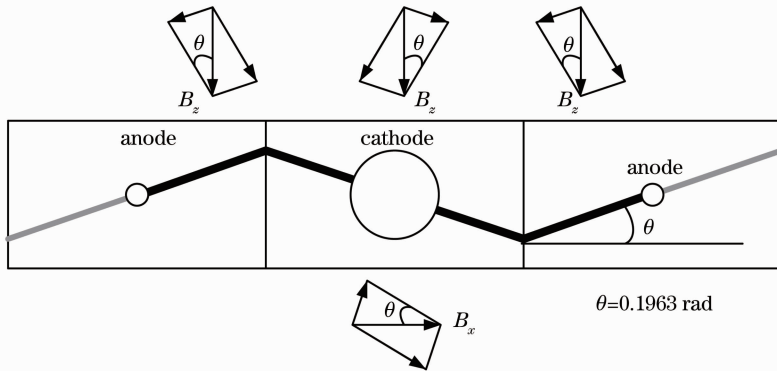


图 7 磁场在各方向的有效分量

Fig. 7 Effective proportion of magnetic field in each direction

从表 1 可以看出,采用最佳工作点控制技术可基本消除纵向塞曼效应的影响,其结果大大优于传统的光强差稳频。当然,由于控制残差、谐振腔的偏振各向异性等原因,还有一定的残余磁敏感度。理论上纵向塞曼效应不会影响 y 轴方向的磁敏感度,

表 1 磁敏感度与控制方式的关系

Table 1 Magnetic sensitivity versus control method

Control method	x	y	z
Intensity difference / [(°)/(h·mT)]	62.63	0.90	26.33
Optimal operating point / [(°)/(h·mT)]	0.28	0.45	0.88

因而与控制方式无关,但由于实验中磁场方向与坐标轴定义方向存在一定的误差, y 轴方向的磁敏感度略有变化。

2) 提高零偏稳定性的有效性

FMDLG 在环境温度变化条件下零偏会产生比较大的变化^[16],最佳工作点控制技术十分有效的改善这一关键性指标。进行如下实验:将同一陀螺放入温度实验箱内,按照“常温—40 °C—60 °C”顺序循环,分别采用传统光强差稳频方式和最佳工作点控制技术对陀螺性能进行测试,测试结果如图 8 所示。

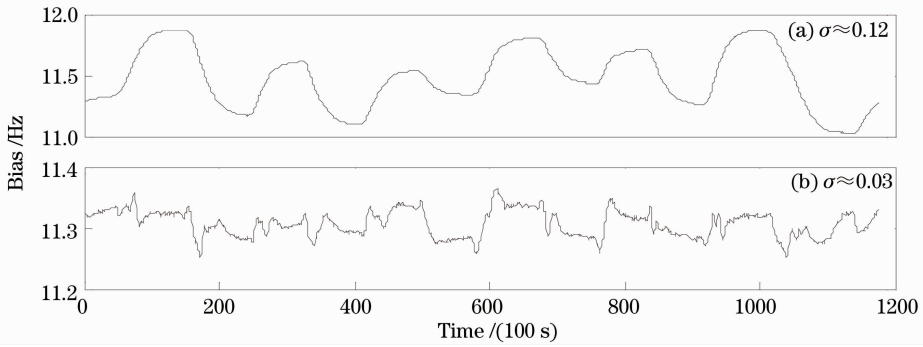


图 8 传统稳频方式下(a)及最佳工作点控制条件下(b) FMDLG 零偏-温度测试曲线

Fig. 8 Bias-temperature test results under traditional path length control method (a) and optimal operating point real-time control method (b)

从以上数据可以看出,在最佳工作点控制条件下,FMDLG 的零偏稳定性有较大的提高,所以该技术是有效的。

3.2.2 最佳工作点控制技术正确性的验证

最佳工作点控制技术作为一种在 FMDLG 上使用的新型控制技术,采用了磁场进行色散平衡以及稳频偏置,这两种方法都人为地影响了陀螺的零偏输出,因此其正确性仍需要通过实验进行验证,接下来通过三个实验进行说明。

- 1) 无输入角速度、温度稳定条件下的长时 FMDLG 性能测试;
- 2) 无输入角速度、不同温度条件下 FMDLG 性能测试;
- 3) 温度稳定、有输入角速度条件下 FMDLG 输出测试。

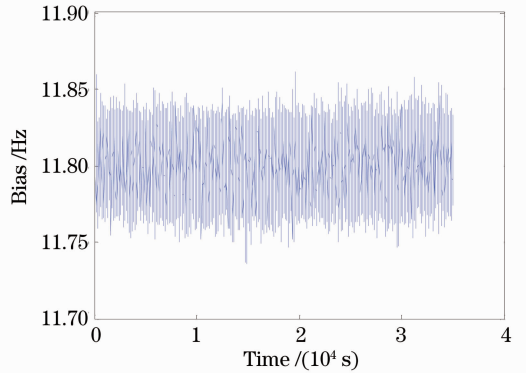


图 9 FMDLG 最佳工作点控制条件下的长时静态测试结果(10 h, $\sigma=0.0024$)

Fig. 9 Long-time static test result of FMDLG under optimal operating point real-time control (10 h, $\sigma=0.0024$)

表 2 不同温度条件下 FMDLG 最佳工作点控制静态测试结果

Table 2 Static test results of FMDLG at different temperatures under optimal operating point real-time control

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Time /h	Bias (average) /Hz	σ /(100 s)
-40	1	11.8265	0.007
-40	1	11.8296	0.006
60	1	11.8302	0.002
60	1	11.8310	0.002

表 3 最佳工作点控制与光强差稳频不同转速条件下陀螺输出比较

Table 3 Comparison of gyro output with different rotation rates under intensity difference and optimal operating point control method

Rotation rate /[($^{\circ}$)/s]	-200	-150	-100	-50	50	100	150	200
Gyro output /Hz	-537584	-403188	-269891	-134396	134397	268792	403188	537584
	-537585	-403188	-268792	-134396	134396	268792	403189	537585

表 3 中正负为区分顺逆时针旋转方向。

以上三个实验的结果表明,采用最佳工作点控制技术的 FMDLG 在静态、动态条件下仍能行使陀

螺的功能,测试结果是正确的,与传统稳频方式结果是一致的。

4 结 论

FMDLG 最佳工作点实时控制技术是一种正确、有效的四频差动激光陀螺新型控制技术,与传统的基于光强差的稳频技术相比,该技术可以大大降低四频差动激光陀螺的磁敏感性,提高零偏稳定性,有望在 FMDLG 进一步工程化中起到提升陀螺性能的重要作用。要进一步提高 FMDLG 的性能,可以进一步着手研究朗缪尔流效应对陀螺零偏的影响,从改进陀螺腔体结构入手^[17],同时也要进一步研究温度补偿在 FMDLG 数据处理中的应用^[18]。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Overview of four-mode differential laser gyros [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 040005
汪之国, 龙兴武, 王 飞. 四频差动激光陀螺综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(4): 040005
- 2 C. H. Volk, S. C. Gillespie, J. G. Mark *et al.*. Multioscillator Ring Laser Gyroscopes and Their Applications [OL]. http://132.228.182.15/by_division/navigationssystem/whitepapers/assets/Multioscillator_Ring_Laser_Gyr.pdf, 2012-08-06
- 3 M. Fernandez, B. Ebner, N. Dahlen. Zero-lock™ laser gyro [C]. San Diego: Proceedings of the Annual Rocky Mountain Guidance and Control Conference, 1989. 235~241
- 4 Northrop Grumman. LN-100G Inertial Navigation System with Embedded GPS [OL]. <http://www.es.northropgrumman.com/solutions/ln100g-inertial-navigation-system/index.html>, 2012-08-06
- 5 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei *et al.*. Choice of operating point for the four-mode differential laser gyros [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 301~304
汪之国, 龙兴武, 王 飞等. 四频差动激光陀螺工作点的选择 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 301~304
- 6 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Dispersion equalization of four-frequency differential laser gyro-scope with non-planar resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2892~2897
汪之国, 龙兴武, 王 飞. 异面腔四频差动激光陀螺的色散平衡 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2892~2897
- 7 Jiang Yanan. Ring Laser Gyro [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. 54~57
姜亚南. 环形激光陀螺 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1985. 54~57
- 8 Yuan Jie, Huang Yun, Han Shengjie *et al.*. The null shift of the differential laser gyro caused by the asymmetry of the left and right gyro's SFC [J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(3): 22~24
袁 杰, 黄 云, 韩生节等. 四频差动激光陀螺由于稳频精度局限等引入的零漂 [J]. *激光杂志*, 2002, **23**(3): 22~24
- 9 Luo Hui, Guo Shaojun, Hu Shaomin *et al.*. Research and design on high precision frequency-stability measurement system of ring laser gyroscope [J]. *Chinese J. Inertial Technology*, 2005, **13**(6): 86~89
罗 晖, 郭少军, 胡绍民等. 激光陀螺仪频率稳定度高精度测量系统的研制 [J]. *中国惯性技术学报*, 2005, **13**(6): 86~89
- 10 T. W. Hahn. Cavity Length Control Apparatus for a Multioscillator; US Patent, 4763026 [P]. 1990-10-26
- 11 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Zero drift sensitivity in four-frequency differential laser gyros [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2011, **40**(9): 1758~1762
汪之国, 龙兴武, 王 飞. 四频差动激光陀螺的零漂敏感性 [J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(9): 1758~1762
- 12 Xie Yuanping. Investigation of Phase-Demodulation and Frequency Stabilization Techniques in Mechanically Dithered Ring Laser Gyroscopes [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2000
谢元平. 机械抖动激光陀螺鉴相解调与稳频技术的研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2000
- 13 T. W. Hahn, D. A. Tazartes, J. G. Mark. Active Magnetic Field Tuning for Dispersion Equalization of a Multi-Oscillator; US Patent, 5374990 [P]. 1994-12-20
- 14 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Path length control for nonplanar four-mode differential laser gyro with hill-climbing method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3233~3238
汪之国, 龙兴武, 王 飞等. 异面腔四频差动激光陀螺的小抖动稳频 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3233~3238
- 15 Xu Guangming, Zhang Bin, Jiang Anguo *et al.*. Laser frequency stabilization for differential ring lasers [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2000, **11**(1): 49~53
许光明, 张 斌, 蒋安国等. 四频差动激光陀螺中的激光稳频 [J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(1): 49~53
- 16 Wang Guochen. Analysis of four mode laser gyro's null shift vibration under high-low temperature process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2037~2040
王国臣. 四频激光陀螺高低温过程中零漂振荡的分析 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2037~2040
- 17 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Research on Langmuir flow patterns in laser gyros [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0502015
汪之国, 龙兴武, 王 飞. 激光陀螺中朗缪尔流形的研究 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0502015
- 18 Wang Guochen. Analysis of performance of four mode laser gyro's null shift in different modes under high-low temperature process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2295~2298
王国臣. 四频激光陀螺不同工作模式下零漂的高低温性能分析 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2295~2298

栏目编辑: 何卓铭